J. Soil Plant Interact. 2024; 15(3): 17–33. https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.21291

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

The Impact of Substrate Type on Physiological and Morphological Performance of Saffron in Soilless Cultivation System

Elham Naseri[1], Mohammad Taghi Ebadi[2], Ali Mokhtassi-Bidgoli[3], Neda Dalir[1] and Rasul Rahnemaie[*1]

1- Department of Soil Science, Tarbiat Modares University, Tehran, 14115-336, Iran
2- Department of Horticultural Science, Tarbiat Modares University, Tehran, 14115-336, Iran
3- Department of Agronomy, Tarbiat Modares University, Tehran, 14115-336, Iran
* Corresponding author, Email: Rahnemaie@modares.ac.ir

(Received: 7 April 2024; Revised: 13 August 2024; Accepted: 13 August 2024)

Abstract

The gradual rise in temperature, reduced rainfall, and soil fertility decline in recent decades have significantly lowered saffron stigma yield. Given saffron's vital economic and social role in Iran, enhancing traditional cultivation methods and advancing industrial cultivation technology are crucial. This study assessed the impact of four non-soil cultivation substrates (three perlite variants - fine, medium, coarse, and a perlite-cocopeat-cocochips mixture) on saffron growth and development. Using a completely randomized design with five replications, the physiological and morphological characteristics of leaf (net photosynthesis rate, total photosynthesis rate, weight, number, and area), corm (weight, number, large-sized percentage), and root (contractile root formation) of saffron were evaluated. Measuring physical indices revealed that the mixed substrate had the most optimal water-to-air ratio. Plants grown in this substrate exhibited the highest leaf weight, net photosynthesis rate, and large-sized cormlet weight (and weight percent). Among the three pure perlite substrates, the medium-sized perlite showed superior physical properties and higher plant yield compared to the other two substrates. Corms grown in the pure perlite substrates produced contractile roots. Overall, the study indicated that despite saffron being a low-water geophyte, adequate water and nutrient supply significantly enhance its physiological and morphological parameters, including nutrient storage in corms, crucial for efficient reproduction in subsequent generations.

Keywords: Cocopeat, Cocochips, Contractile root, Hydroponic, Perlite.

Background and Objective: Saffron is a sterile plant that reproduces through the growth and development of meristem tissues on the mother corm's surface (corm) and the production of cormlets (cormlets). The increase in cormlet production is directly related to corm weight. Enhancing the quantity and quality of the corm leads to greater production of cormlets, flowers, and stigmas (Negbi, 1999). Over the past five decades, stigma yield has declined by 35% (Ministry of Agriculture Jihad, 2022), partly due to climate changes and a decrease in irrigation water quantity and quality. Cultivating saffron under controlled conditions has been proposed as a viable solution (Sabet Teimouri et al., 2010). Given that the choice of substrate significantly impacts plant growth and crop yield (Verdonck et al., 1981), evaluating different substrates is crucial for selecting the most suitable one (Olle et al., 2012). This study aims to assess the moisture characteristics of various substrates and determine the optimal saffron cultivation medium based on the plant's physiological and morphological responses.

Methods: The physical characteristics of six substrate types were initially assessed, comprising four pure perlites of varying size and two mixed media blends of perlite with cocopeat and cocochips. From which, three pure perlite

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

substrates with particle sizes of > 1, 3–5, and 7–10 mm, along with a mix of 70 %v/v perlite, 15 %v/v cocopeat, and 15 %v/v cocochips, were selected for further analysis in the presence of saffron plants. The aim was to identify the most suitable substrate for saffron cultivation based on the morphological and physiological responses of different plant parts. The experiment followed a randomized complete design with five replications, evaluating characteristics such as net photosynthesis rate, total photosynthesis rate, leaf characteristics (weight, number, and area), corm traits (weight, number, and size distribution), and the formation of contractile roots.

Results: The M4 substrate (70:15:15 perlite:cocopeat:cocochips mixture), with 78 %v/v total porosity, exhibited the best water-to-air ratio among the substrates. In pure perlites, M2 substrate (1–3 mm granules) showed the most suitable water-to-air ratio. Physiological and morphological characteristics were influenced by all substrate types. The M1 (< 1 mm granules) and M3 (3–5 mm granules) substrates showed the least plant part functionality. Although the M4 substrate displayed higher leaf weight and net photosynthesis rate compared to M2, no significant difference was noted for the leaf area and total photosynthesis values. However, the M4 substrate had the highest weight of large cormlets and the percentage of large-sized cormlets. The experimental data indicated that saffron leaf thickness is influenced by substrate type and moisture conditions. The thickness is not accounted for in leaf area calculations while it plays a crucial role in total plant photosynthesis rate. Notably, saffron plants grown in pure perlite substrates produced contractile roots, which hinders cormlet development. No contractile roots were observed in the perlite:cocopeat:cocochips mixed substrate.

Conclusions: Substrate characteristics are the key factor controlling water and nutrient supply to saffron in hydroponic systems. Despite saffron being a geophyte with low water and nutrient requirements, an optimal growing substrate leads to notable enhancements in leaf physiological and morphological characteristics, boosting nutrient storage in corms for efficient reproduction in the next generations.

References:

1. Ministry of Agriculture Jihad. 2022. Agricultural Statistics: Horticultural and Greenhouse Products. Available: https://maj.ir/Dorsapax/userfiles/Sub65/Aj3-1401.pdf.
2. Negbi, M., 1999. Saffron Cultivation: Past, Present and Future Prospects, Vol. 154. Harwood Academic, Amsterdam.
3. Olle, M., Ngouajio, M., Siomos, A., 2012. Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: a review. Agriculture 99(4), 399–408.
4. Sabet Teimouri, M., Kafi, M., Avarseji, Z., Orooji, K., 2010. Effect of drought stress, corm size and corm tunic on morphoecophysiological characteristics of saffron (*Crocus sativus* L.) in greenhouse conditions. J. Agroecol. 2(2), 323–334.
5. Verdonck, O, De Vleeschauwer, D., De Boodt, M., 1982. The influence of the substrate to plant growth. Acta Hortic. 126, 251–258. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1982.126.30.

How to Cite: Naseri, E., Ebadi, M.T., Mokhtassi-Bidgoli, A., Dalir, N., Rahnemaie, R., 2024. The impact of substrate type on physiological and morphological performance of saffron in soilless cultivation system. J. Soil Plant Interact. 15(3), 17–33 (In Persian). https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.21291

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۳؛ (۳)۱۵: ۳۳-۱۷، https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.21291

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۵۰۱۴-۲۷۸۳ شاپا الکترونیکی: ۵۲۸۶-۲۷۸۳

مقاله پژوهشی

اثر نوع بستر بر عملکرد فیزیولوژیک و مورفولوژیک زعفران در سیستم کشت بدون خاک

الهام ناصری[۱]، محمدتقی عبادی[۲]، علی مختصی بیدگلی[۳]، ندا دلیر[۱] و رسول راهنمایی[۱*]

۱- گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ. ۳۳۶-۱۴۱۱۵، تهران، ایران

۲- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ. ۳۳۶-۱۴۱۱۵، تهران، ایران

۳- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ. ۳۳۶-۱۴۱۱۵، تهران، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Rahnemaie@modares.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۳)

چکیده

افزایش تدریجی دما، کاهش بارش و کاهش حاصلخیزی خاک در دهه‌های اخیر موجب کاهش شدید عملکرد کلاله زعفران شده است. با توجه به اهمیت اقتصادی و اجتماعی زعفران در ایران، توسعه دانش و فناوری به‌منظور افزایش عملکرد کشت سنتی و توسعه کشت صنعتی آن بسیار ضروری است. بنابراین در این پژوهش گلخانه‌ای، ابتدا ویژگی‌های فیزیکی شش نوع مخلوط مواد اولیه بستر کشت بررسی شد. سپس اثر چهار نوع آن‌ها (شامل سه پرلیت با دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت و یک مخلوط پرلیت-کوکوپیت-کوکوچیپس) بر رشد و نمو زعفران در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار بررسی، و ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک برگ (شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای، شدت فتوسنتز کل، وزن، تعداد و سطح)، بنه (وزن، تعداد و درصد بنه‌های درشت) و ریشه (تشکیل ریشه‌های رابط) زعفران ارزیابی شد. اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی چهار نوع بستر کشت نشان داد که بستر مخلوط دارای مناسب‌ترین نسبت رطوبت به هوا است. گیاهان کشت‌شده در این تیمار دارای بیش‌ترین وزن برگ، شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای، و وزن (و درصد وزنی) بنه دختری درشت بودند. در بین سه بستر پرلیت خالص، پرلیت با اندازه متوسط ویژگی‌های فیزیکی بهتری داشت و عملکرد گیاهان در این بستر در مجموع بیش‌تر از دو بستر دیگر بود. بنه‌های کشت‌شده در سه بستر پرلیت خالص ریشه رابط تولید کردند. در مجموع یافته‌های این پژوهش نشان داد که هرچند زعفران گیاهی ژئوفیت با نیاز آبی کم معرفی شده است اما تأمین کافی آب و عناصر غذایی موجب بهبود معنی‌دار ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک، از جمله افزایش ذخیره عناصر غذایی در بنه‌ها می‌شود که برای تکثیر کارآمد آن در نسل‌های بعدی ضروری است.

واژه‌های کلیدی: پرلیت، کوکوپیت، کوکوچیپس، ریشه رابط، هیدروپونیک.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

ماندگاری پایدار جوامع انسانی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، به مدیریت صحیح مصرف آب و سازگاری با اقلیم بستگی دارد. انتخاب و توسعه کشت زعفران به وسیله ساکنان گذشته این سرزمین، انتخابی هوشمندانه در مسیر سازگاری با اقلیم بوده است؛ چون زعفران نیاز آبی نسبتاً کمی دارد و دوره رشد و نمو آن در دو فصل پاییز و زمستان، منطبق بر دوره بارش‌های طبیعی است. از طرف دیگر، محصول زعفران بسیار کم حجم ولی بسیار گران‌قیمت است و صادرات آن ارزش افزوده بسیار زیادی ایجاد می‌کند. در عین‌حال، تولید، برداشت و فرآوری زعفران به نیروی کار زیادی نیاز دارد. از این‌رو توسعه کشت زعفران از نظر اقتصادی، اجتماعی و زیست-محیطی اهمیت بسیار زیادی دارد.

زعفران گیاهی عقیم است که در اثر رشد بافت‌های مریستمی در سطح بنه مادری (بنه) و تولید بنه‌های جدید (بنه دختری) تکثیر می‌شود. هر بنه دختری، در سال یا سال‌های بعد نقش بنه مادری را بازی می‌کند (Fernández, 2004; Gresta et al., 2009). ایفای این نقش تابعی مستقیم از وزن بنه دختری است؛ بنابراین افزایش وزن و کیفیت بنه (مادری) موجب افزایش تولید بنه دختری، گل و کلاله می‌شود (Negbi, 1999; de Juan et al., 2009). این در حالی است که در پنج دهه اخیر عملکرد کلاله از ۶/۱۵ به ۴ کیلوگرم بر هکتار (معادل با ۳۵ درصد) کاهش یافته است (Ministry of Agriculture Jihad, 2022).

با توجه به افزایش تدریجی دما و کاهش بارش طی چند دهه اخیر و پیش‌بینی تشدید این دو بحران در آینده و عوارض جانبی آن مانند خشکسالی و کاهش حاصلخیزی خاک، تولید زعفران در شرایط کنترل‌شده گلخانه‌ای می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش کشت سنتی باشد (Sabet Teimouri et al., 2010; Koocheki and Seyyedi, 2016). در چنین شرایطی بسترهای غیرخاکی ممکن است به تدریج جایگزین خاک شوند (Mollafilabi et al., 2014). از آنجا که نوع بستر کشت به‌طور مستقیم و غیرمستقیم، بر رشد گیاه و تولید محصول اثر می‌گذارد (Verdonck et al., 1982)، ارزیابی اثر انواع بستر کشت به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین نوع بستر برای کشت زعفران بسیار مهم است. بسترهای کشت غیرخاکی، معمولاً عاری از عوامل بیماری‌زا هستند (Packer and Clay, 2000)، ساختار فیزیکی پایداری دارند (Yang et al., 2017) و از نظر شیمیایی نسبتاً خنثی می‌باشند (Malandrino et al., 2006). بین انواع بسترهای آلی و معدنی، پیت ماس، پرلیت، ورمیکولیت و کوکوپیت ممکن است گزینه‌های مناسبی برای بستر کشت زعفران باشند (Mollafilabi et al., 2014).

پرلیت یکی از بسترهای معدنی مناسب برای رشد انواع گیاهان است (Blythe et al., 2005; Cole et al., 2005). به دلیل تخلخل و ناهمواری سطحی، پرلیت گنجایش جذب آب زیادی دارد که در مکش‌های ماتریک کم در پاسخ به نیاز گیاه به تدریج آزاد می‌شود. چنین بستری هوادهی مناسب ناحیه رشد ریشه (ریزوسفر) را فراهم می‌کند، اما به دلیل زهکشی خیلی سریع، به آبیاری مکرر نیاز دارد تا تنش آبی به گیاه وارد نشود (Maloupa et al., 1992). در نقطه مقابل، کوکوپیت قرار دارد که ماده‌ای آلی با گنجایش نگهداری آب زیاد (۵۰ تا ۸۰ درصد حجمی) و گنجایش تهویه‌ای کم است (Awang et al., 2009)؛ از این‌رو در چنین بستری پخشیدگی اکسیژن به‌سمت ریشه گیاهان به‌خوبی انجام نمی‌شود. بر این اساس، افزودن کوکوپیت به پرلیت موجب افزایش گنجایش نگهداری آب و کاهش دور آبیاری می‌شود. از این‌رو، در اغلب گلخانه‌های کشور از مخلوط کوکوپیت و پرلیت برای بستر کشت صیفی‌جات و گیاهان زینتی، که نیاز آبی زیادی دارند، استفاده می‌شود. بنابراین استفاده از این نوع بستر برای کشت زعفران، که نیاز آبی کم‌تری دارد، نیز ممکن است مناسب باشد.

هر چند نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که روش کشت هیدروپونیک راهکاری مناسب برای افزایش عملکرد بنه و کلاله زعفران است (Souret and Weathers, 2000; Maggio et al., 2006)، اما بهینه‌سازی این روش نیازمند بررسی دقیق اثر متغیرهای مختلفی است که از جمله آن‌ها می‌توان به ویژگی‌های

جدول ۱. اثر نوع و نسبت اجزای تشکیل‌دهنده بستر کشت بر تخلخل کل (TP)، گنجایش نگهداری آب (WHC)، و گنجایش تهویه‌ای (AC)

Table 1. The impact of substrate constituents' type and ratio on total porosity (TP), water holding capacity (WHC), and aeration capacity (AC)

Mixture	Substrate composition	TP (%v/v)	WHC (%v/v)	AC (%v/v)
1	100% Perlite <1 mm	74	55	19
2	100% Perlite 1–3 mm	64	21	43
3	100% Perlite 3–5 mm	72	27	45
4	100% Perlite 7–10 mm	63	11	52
5	70% Perlite 3–5 mm + 30% cocopeat	61	20	41
6	70% Perlite 3–5 mm + 15% cocopeat + 15% cocochips	78	43	35

فیزیکی مواد اولیه بستر کشت اشاره کرد. بنابراین با توجه به اهمیت اقتصادی تولید کلاله زعفران در ایران، و بر اساس این فرضیه که یکی از عوامل کاهش عملکرد کلاله زعفران، کاهش کیفیت بنه‌های دختری و یکی از عوامل کاهش کیفیت بنه‌های دختری، کاهش کمیت و کیفیت آب آبیاری است، در این پژوهش اثر ویژگی‌های فیزیکی بستر کشت بر پاسخ‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک گیاه زعفران در سیستم کشت هیدروپونیک بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس در سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ انجام شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی مواد بستر کشت

به‌منظور ارزیابی اثر نوع مواد تشکیل‌دهنده بستر کشت هیدروپونیک بر رشد و نمو گیاه زعفران، چهار نوع پرلیت با دانه‌بندی متفاوت و دو مخلوط پرلیت با کوکوپیت و کوکوچیپس تهیه شد که در ادامه مخلوط‌های یک تا شش نامیده می‌شوند (جدول ۱). مخلوط‌های یک تا چهار از پرلیت خالص، به‌ترتیب، با اندازه ذرات ۱>، ۳-۱، ۵-۳ و ۱۰-۷ میلی‌متر تهیه شدند. مخلوط پنج از نسبت ۷۰ به ۳۰ (حجمی) پرلیت به کوکوپیت، و مخلوط شش از نسبت ۷۰ به ۱۵ به ۱۵ (حجمی) پرلیت به کوکوپیت (۳-۰/۵ میلی‌متر) به کوکوچیپس (۲-۱ سانتی‌متر) تهیه شدند. ویژگی‌های فیزیکی هر شش مخلوط، شامل تخلخل کل، گنجایش نگهداری آب و گنجایش تهویه‌ای آن‌ها با سه تکرار اندازه‌گیری شدند.

شش گلدان هم‌اندازه با قطر درونی ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر، با مخلوط‌های (هوا-خشک) یک تا شش پر شد و مجموع وزن گلدان و مخلوط درون آن (گرم) اندازه‌گیری شد (وزن اول: W_1). گلدان‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب (به ارتفاع ۲۳ سانتی‌متر، سه سانتی‌متر بالاتر از ارتفاع بستر در گلدان) قرار گرفتند تا با نفوذ تدریجی آب از زیر گلدان به‌طور کامل اشباع شوند. سپس وزن آن‌ها مجدداً اندازه‌گیری شد (وزن دوم: W_2). در مرحله بعد روی گلدان‌ها، برای جلوگیری از تبخیر سطحی، پوشانده شد و به مدت ۱۲ ساعت به حال خود رها شدند تا آب ثقلی آن‌ها خارج شود. پس از آن، گلدان‌ها مجدداً وزن شدند (وزن سوم: W_3). بر مبنای اختلاف بین وزن‌های اول و دوم، تخلخل کل (TP) (معادله ۱) و بر مبنای اختلاف بین وزن‌های اول و سوم، گنجایش نگهداری آب (WHC) محاسبه شد (معادله ۲). اختلاف بین تخلخل کل و گنجایش نگهداری آب به‌عنوان تخلخل تهویه‌ای (AC) در نظر گرفته شد. در این دو معادله، حجم کل با نماد V_t (سانتی‌متر مکعب) و چگالی آب با نماد ρ_w (گرم در سانتی‌متر مکعب) نشان داده شده‌اند (Mavrogianopoulos, 2016):

$$TP = \frac{W_2 - W_1}{V_t \times \rho_w} \quad (۱)$$

$$WHC = \frac{W_3 - W_1}{V_t \times \rho_w} \quad (۲)$$

اثر نوع بستر کشت بر رشد بنه دختری زعفران

برای ارزیابی اثر نوع بستر کشت بر رشد و نمو بنه دختری زعفران، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار اجرا شد بدین منظور، از مخلوط‌های شماره یک، سه، چهار و شش، که ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها پیش‌تر تعیین شده بود (جدول ۱)، استفاده شد که در ادامه به‌ترتیب بستر کشت یک تا چهار (M1، M2، M3 و M4) نامیده می‌شوند. معیار انتخاب این بسترها قابل دسترس بودن در بازار و تنوع ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها بود. بدین منظور ابتدا پرلیت، کوکوپیت و کوکوچیپس به‌طور جداگانه و تا زمان کاهش رسانایی الکتریکی (EC) محلول آن‌ها به حدود ۰/۸ دسی‌زیمنس بر متر با آب گلخانه شسته شدند. پس از هوا-خشک‌شدن، حجم معینی از هر نوع بستر به گلدان‌های ۱۵ لیتری (۲۰×۴۰ سانتی‌متر)، تا ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری، افزوده شد.

برای اجرای آزمایش‌ها، از بنه‌های سالم و یکدست زعفران با میانگین وزن ۱۲ تا ۱۵ گرم، تهیه‌شده از استان خراسان، استفاده شد. پیش از کاشت، بنه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در محلول یک درصد قارچ‌کش رورال خیسانده و سپس هوا-خشک شدند. کاشت بنه‌ها در اوایل مهرماه انجام شد، به این صورت که، در هر گلدان، سه بنه در عمق ۱۵ سانتی‌متری کاشته شد. بدین ترتیب هر تیمار دارای ۵ تکرار (پنج گلدان) و هر گلدان دارای سه بنه بود. از زمان کاشت تا گل‌دهی، گلدان‌ها هفته‌ای یک‌بار با آب گلخانه، که pH آن با افزودن اسید سولفوریک به حدود ۷ کاهش یافته بود، آبیاری شدند. پس از پایان دوره گل-دهی، از اواخر آبان ماه، هر یک از گلدان‌ها از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای خودکار، هفته‌ای یک‌بار به‌طور همزمان حجم معینی محلول غذایی دریافت کردند که ترکیب یونی آن در جدول (۲) ذکر شده است. حجم محلول غذایی به‌ازای هر گلدان، در آبان ماه ۱۵۰ میلی‌لیتر انتخاب شد. با هدف ثابت نگه‌داشتن رسانایی الکتریکی (EC) محلول محیط ریشه گیاهان، این حجم پس از دی ماه به هفته‌ای ۵۵۰ میلی‌لیتر افزایش یافت.

اندازه‌گیری شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای و محاسبه شدت فتوسنتز کل هر بوته

در اسفند ۱۳۹۹، در مرحله رشد رویشی بنه‌های دختری، زمانی که رشد برگ‌ها به اندازه بیشینه خود رسید و فتوسنتز مقدار نسبتاً ثابتی داشت (Renau-Morata et al., 2012)، شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای (P_n) بوته‌های زعفران با دستگاه لایکور LICOR-6400 (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE) اندازه‌گیری شد. همزمان تعداد برگ‌های هر بوته نیز شمارش شده و سطح هر برگ با ضرب طول برگ در میانگین عرض آن محاسبه شد. سپس شدت فتوسنتز کل گیاه (میکرومول دی‌اکسید کربن بر ثانیه) با ضرب شدت فتوسنتز خالص لحظه-ای (میکرومول دی‌اکسید کربن بر مترمربع بر ثانیه) در سطح کل برگ‌های هر بوته (مترمربع) (معادله ۳) محاسبه شد:

شدت فتوسنتز کل هر بنه = شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای × سطح کل برگ‌های هر بنه (۳)

اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های مورفولوژیک برگ و بنه دختری در انتهای دوره رشد

پس از زرد شدن برگ‌ها، در انتهای فروردین ۱۴۰۰، گلدان‌ها تخلیه شدند و ویژگی‌های مورفولوژیک برگ و بنه زعفران از جمله وزن خشک برگ، تعداد و وزن تازه بنه‌های دختری به تفکیک اندازه و همچنین درصد ریشه‌های رابط[1] اندازه‌گیری شد. درصد ریشه‌های رابط به‌صورت کیفی توسط روش آماری کای اسکوئر براساس تولید یا عدم تولید این نوع ریشه در قسمت تحتانی بنه‌های دختری بررسی شد.

تجزیه آماری داده‌ها

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها توسط نرم افزار SAS 9.3 (SAS Institute, Cary, NC, USA) و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. پیش از تجزیه واریانس داده‌ها، آزمون نرمال‌بودن داده‌ها انجام

1. *Contractile* roots

جدول ۲. ترکیب یونی محلول غذایی مورد استفاده برای تغذیه بوته‌های زعفران و ترکیب یونی آب چاه گلخانه که از آن برای ساخت محلول غذایی استفاده شده است (غلظت یون‌ها بر حسب میکرومولار و رسانایی الکتریکی، EC، برحسب دسی‌زیمنس بر متر است).

Table 2. The ionic composition of the nutrient solution used to feed the saffron plants and the ionic composition of the greenhouse well water that was used to make the nutrient solution (The concentration of ions is in micromolar and the electrical conductivity, EC, is in dS/m).

Ion	Ca	Mg	K	NH_4	NO_3	SO_4	PO_4	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo	Na	HCO_3	Cl	pH	EC
Well water	900	250	16	-	87	1200	-	-	-	-	-	19	-	3480	1923	1045	8.3	0.74
Nutrient solution	2478	1128	3239	450	9336	1556	900	25	9	1.4	6	25	0.5	3480	<1000	1045	5.8	1.53

گرفت و پس از اطمینان از توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها، تجزیه واریانس از طریق مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) انجام شد. برای داده‌های ریشه‌های رابط از روش غیرپارامتریک و با استفاده از رویه GENMOD روش کای اسکوئر استفاده شد.

نتایج

ویژگی‌های فیزیکی بستر کشت

جدول (۱) اثر نوع و نسبت مواد اولیه سازنده بستر کشت هیدروپونیک بر تخلخل کل (TP)، گنجایش نگهداری آب (WHC) و تخلخل تهویه‌ای (AC) را نشان می‌دهد. چهار مخلوط اول، اثر اندازه ذرات پرلیت خالص، به‌ترتیب از ریز به درشت، را نشان می‌دهد. مخلوط یک دارای بیش‌ترین تخلخل کل (۷۴٪) و گنجایش نگهداری آب (۵۵٪) است ولی کم‌ترین تخلخل تهویه‌ای (۱۹٪) را دارد. درحالی‌که مخلوط چهار کم‌ترین تخلخل کل (۶۳٪) و گنجایش نگهداری آب (۱۱٪) ولی بیش‌ترین تخلخل تهویه‌ای (۵۲٪) را دارد. مقایسه مخلوط دو و سه، که از پرلیت متوسط تهیه شده‌اند، نشان می‌دهد که گنجایش نگهداری آب در مخلوط سه در حدود ۳۰ درصد بیش‌تر از مخلوط دو است. این داده‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های فیزیکی (TP، WHC و AC) بستر کشت ساخته‌شده از پرلیت خالص، از یک طرف تحت تأثیر اندازه ذرات و از طرف دیگر تحت تأثیر توزیع و آرایش منافذ ریز و درشت بین ذرات پرلیت قرار می‌گیرد.

مخلوط‌های پنج و شش، علاوه بر داشتن ۷۰ درصد پرلیت با اندازه ۵-۳ میلی‌متر، مشابه با پرلیت مورد استفاده در مخلوط سه، دارای درصدی کوکوپیت و کوکوچیپس هستند. جدول (۱) نشان می‌دهد که افزودن ۳۰ درصد کوکوپیت به پرلیت متوسط موجب کاهش تخلخل کل از ۷۲ درصد در مخلوط سه به ۶۱ درصد در مخلوط پنج می‌شود، درحالی‌که افزودن ۳۰ درصد مخلوط کوکوپیت و کوکوچیپس به پرلیت متوسط موجب افزایش تخلخل کل از ۷۲ درصد در مخلوط سه به ۷۸ درصد در مخلوط شش می‌شود.

اثر نوع بستر کشت بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک برگ زعفران

نتایج تجزیه واریانس در جدول (۳) نشان می‌دهد که تیمارها اثری معنی‌دار بر شاخص‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه زعفران، از جمله وزن، تعداد و سطح برگ، شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای و شدت فتوسنتز کل هر بوته زعفران، در سطح احتمال یک درصد، داشتند.

الف. وزن و تعداد برگ

مقایسه میانگین داده‌ها در شکل (۱) نشان می‌دهد که گیاه زعفران در بین سه بستر پرلیت خالص (M1، M2 و M3)، در بستر دو با تولید ۰/۱۷ گرم برگ بر بنه دختری، وزن برگ بیش‌تری نسبت به دو بستر یک و سه تولید کرده است. در عین حال، در بستر چهار (تیمار M4)، که دارای ۳۰ درصد کوکوپیت و کوکوچیپس است، وزن برگ (۰/۲۴ گرم بر بنه دختری) بیش‌تری نسبت به سه بستر پرلیتی تولید کرده است و اختلافی معنی‌دار با سایر تیمارها دارد. علاوه بر این، تعداد برگ تولیدشده نیز در بستر دو نسبت به سه بستر دیگر بیش‌تر است هرچند این اختلاف بین بستر دو و سه معنی‌دار نیست.

ب. شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای

شکل (۲) مقایسه میانگین اثر نوع بستر کشت بر شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای برگ زعفران را نشان می‌دهد. شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای به شدت متأثر از تیمارها یا به عبارتی ویژگی‌های فیزیکی بستر کشت است، زیرا مقدار آن در هر چهار تیمار با یکدیگر اختلاف معنی‌دار دارند. تیمار چهار (M4) دارای بیش‌ترین شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای (۶/۶۷ میکرومول دی‌اکسید کربن بر مترمربع بر ثانیه) است و پس از آن، با ۱۳ درصد کاهش، تیمار دو (۵/۸۳ میکرومول دی‌اکسید کربن بر مترمربع بر ثانیه) قرار دارد. پس از آن به‌ترتیب M1 و M3 با کم‌ترین مقادیر قرار دارند.

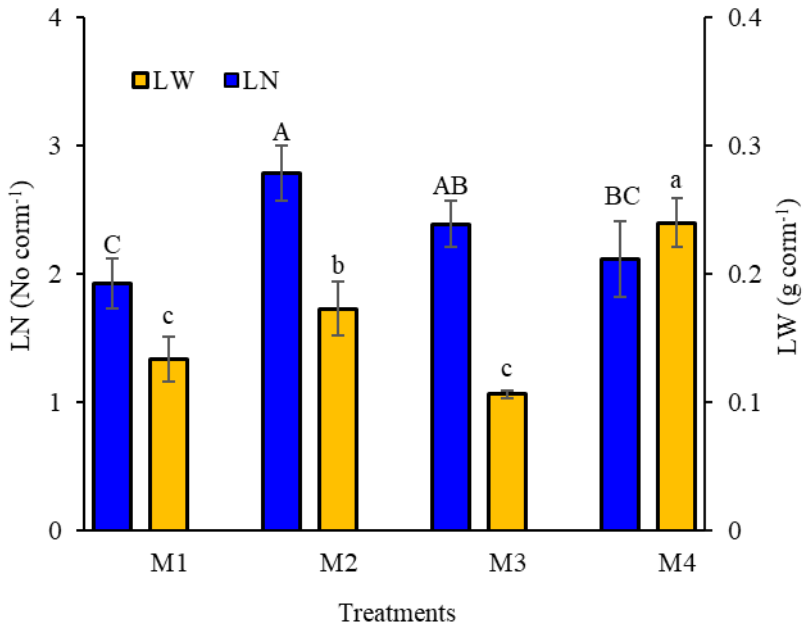
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر نوع بستر کشت بر وزن برگ (LW)، تعداد برگ (LN)، سطح برگ (LA)، شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای (Pn)، شدت فتوسنتز کل (TPR)، وزن کل بنه‌های دختری (DCW)، تعداد کل (DCN) بنه‌های دختری، درصد بنه‌های دختری درشت (LDC)، وزن بنه‌های دختری (DCW) و تعداد بنه دختری زعفران (DCN) به تفکیک اندازه بنه درشت (Large)، متوسط (Medium) و ریز (Small)

Table 3. Results of analysis of variance of the effect of substrate on leaf weight (LW), leaf number (LN), leaf area (LA), net photosynthetic rate (Pn), total photosynthetic rate (TPR), Total Daughter corm Weight (DCW), Total Daughter corm Number (DCN), Large-sized Daughter corm (LDC), weight (DCW) and number (DCN) of daughter corms by corm size of Small, Medium, Large

منابع تغییر Sources of variation	df	LW	LN	LA	Pn	TPR	DCW	DCN	LDC (%)	DCN			DCW		
										Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
بستر کشت Substrate	3	0.01854**	0.7026**	63.7734**	10.7262**	341.7142**	5.0752**	0.4256*	1760.3**	0.9066**	0.02868*	0.0697**	2.0115**	0.6394*	7.0971**
خطا Error	16	0.0008	0.0922	7.6030	0.2440	17.7357	0.3161	0.1143	8.5	0.1252	0.0055	0.0014	0.1143	0.1226	0.1009
ضریب تغییرات (٪) Coefficient variation (%)	-	17.1	13.2	25.2	9.8	28.8	11.3	19.6	11.8	29.0	19.9	27.2	16.2	23.2	23.4

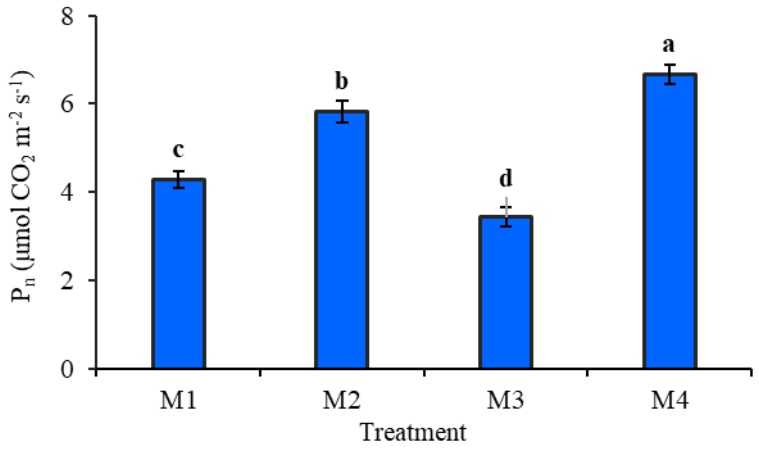
ns، * و **: به‌ترتیب بیانگر اثر غیرمعنی‌دار، و اثر معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد است.

ns, * and ** stand for non-significant effect, and significant effects at five and one percent probability levels, respectively.



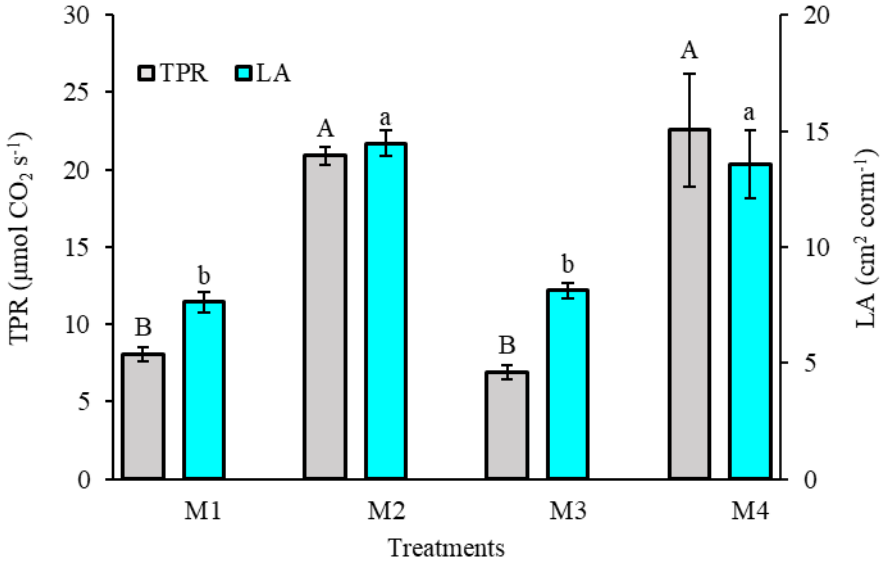
شکل ۱. مقایسه میانگین اثر نوع بستر کشت (M1، M2، M3 و M4) بر تعداد (LN) و وزن (LW) برگ زعفران. خطای معیار روی ستون‌ها رسم شده است. ستون‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند. مقایسه میانگین داده‌های LN با حروف بزرگ و مقایسه میانگین LW با حروف کوچک نمایش داده شده است.

Fig. 1. Mean comparison of the effect of substrate type (M1, M2, M3 and M4) on the weight (LW) and number (LN) of saffron leaves. The standard error is plotted on the bars. The bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$). The mean comparison of the LN data is shown in captal letters, while the mean comparison of the LW data is shown in lowercase letters.



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر نوع بستر کشت (M1، M2، M3 و M4) بر شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای (P_n). خطای معیار روی ستون‌ها رسم شده است. ستون‌های با حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Fig. 2. Mean comparison of the effect of substrate type (M1, M2, M3 and M4) on the net photosynthesis rate (P_n). The standard error is plotted on the bars. The bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$)



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر نوع بستر کشت (M1، M2، M3 و M4) بر شدت فتوسنتز کل (TPR) و سطح برگ (LA). خطای معیار روی ستون‌ها رسم شده است. ستون‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند. مقایسه میانگین داده‌های TPR با حروف بزرگ و مقایسه میانگین داده‌های LA با حروف کوچک نمایش داده شده‌است.

Fig. 3. Mean comparison of the effect of substrate type (M1, M2, M3 and M4) on total photosynthesis rate (TPR) and leaf area (LA). The standard error is plotted on the bars. The bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$). The mean comparison of the TPR data is shown in captal letters, while the mean comparison of the LA data is shown in lowercase letters.

ج. شدت فتوسنتز کل

علاوه بر شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای (شکل ۲) که تحت تأثیر نوع بستر کشت قرار گرفت، نتایج اندازه‌گیری سطح برگ (شکل ۳) نشان می‌دهد که این ویژگی نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع بستر قرار می‌گیرد. در نتیجه تغییر در نوع بستر موجب اختلاف معنی‌دار در شدت فتوسنتز کل بنه‌ها نیز می‌شود (شکل ۳). بیش‌ترین سطح برگ (تقریباً ۱۴ سانتی‌مترمربع بر بنه دختری) و شدت فتوسنتز کل (تقریباً ۲۱/۸ میکرومول دی‌اکسید کربن برثانیه) در تیمارهای دو و چهار حاصل شد.

اثر نوع بستر کشت بر ویژگی‌های مورفولوژیک بنه زعفران

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان می‌دهد که اثر نوع بستر بر ویژگی‌های مورفولوژیک بنه دختری، از جمله بر وزن، تعداد کل، تعداد به تفکیک سه اندازه درشت (> ۸ گرم)، متوسط (۸-۴ گرم) و ریز (< ۴ گرم)، و بر درصد فراوانی بنه دختری درشت معنی‌دار شده است.

الف. تعداد بنه دختری

جدول (۴) اثر نوع بستر کشت بر تعداد کل بنه دختری و به تفکیک سه گروه وزنی را نشان می‌دهد. در تیمار دو، ۱/۲۹ بنه دختری به ازای هر بنه (مادری) تولید شده است که نسبت به بنه‌های دختری تولیدشده به ازای هر بنه در سه تیمار دیگر کاهشی معنی‌دار نشان می‌دهد، اما تعداد بنه‌های دختری تولیدشده در سه تیمار دیگر، با یکدیگر اختلافی معنی‌دار ندارند. درحالی‌که تعداد بنه دختری بزرگ‌تر از ۸ گرم در تیمار دو به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سه تیمار دیگر است؛ در این تیمار ۰/۲۷ بنه دختری درشت به ازای هر بنه تولید شده است. پس از تیمار دو، تیمار چهار بیش‌ترین تعداد بنه دختری درشت، ۰/۲ بنه دختری به ازای هر بنه، را تولید کرده است. تیمارها اختلاف نسبتاً کمی از نظر تعداد بنه دختری متوسط دارند اما در تولید بنه دختری ریز اختلافی معنی‌دار دارند و تیمار دو منجر به تولید کم‌ترین تعداد بنه دختری ریز شده است.

جدول ۴. اثر نوع بستر کشت (M1، M2، M3 و M4) بر تعداد کل (DCN) و وزن کل (DCW) بنه دختری و به تفکیک سه گروه وزنی، و همچنین درصد وزنی بنه‌های دختری با اندازه درشت (LDC)

Table 4. Mean comparison of the effect of substrate type (M1, M2, M3 and M4) on the total number (DCN) and total weight (DCW) of cormlets and by their three weight groups, as well as the weight percentage of large-sized cormlets (LDC)

Treatment	DCN (No. corm^{-1})				DCW (g corm^{-1})				LDC (%)
	Total	>8	4-8	<4	Total	>8	4-8	<4	
M1	1.91^{a}	0.05^{c}	0.29^{c}	1.57^{a}	4.37^{c}	0.42^{c}	1.09^{c}	2.85^{a}	9.72^{c}
M2	1.29^{b}	0.27^{a}	0.43^{ab}	0.60^{b}	5.25^{b}	2.02^{b}	1.79^{ab}	1.45^{c}	38.57^{b}
M3	1.82^{a}	0.03^{c}	0.45^{a}	1.35^{a}	3.97^{c}	0.29^{c}	1.32^{bc}	2.35^{b}	7.47^{c}
M4	1.89^{a}	0.20^{b}	0.33^{bc}	1.36^{a}	6.24^{a}	2.71^{a}	1.83^{a}	1.70^{c}	43.21^{a}

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each column, the numbers with a common letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

ب. وزن بنه دختری

جدول (۴) همچنین اثر نوع بستر کشت بر وزن کل بنه دختری و به تفکیک سه گروه وزنی را نشان می‌دهد. تیمار چهار منجر به تولید ۶/۲۴ گرم بنه دختری به ازای هر بنه (مادری) شده است که افزایشی معنی‌دار نسبت به سه تیمار دیگر دارد. از این مقدار ۲/۷۱ گرم به تولید بنه درشت اختصاص دارد که مجدداً اختلافی معنی‌دار نسبت به سه تیمار دیگر دارد. پس از تیمار چهار، بیش‌ترین وزن کل، ۵/۲۵ گرم بنه دختری به ازای هر بنه، و بیش‌ترین وزن بنه درشت، ۲/۰۲ گرم بنه دختری به ازای هر بنه، در تیمار دو حاصل شده است. تغییر در بستر کشت اثری معنی‌دار بر وزن بنه‌های دختری متوسط و ریز این دو تیمار نگذاشته است. تیمارهای یک و سه نیز اختلاف قابل توجهی با یکدیگر ندارند.

ج. درصد وزنی بنه‌های دختری درشت

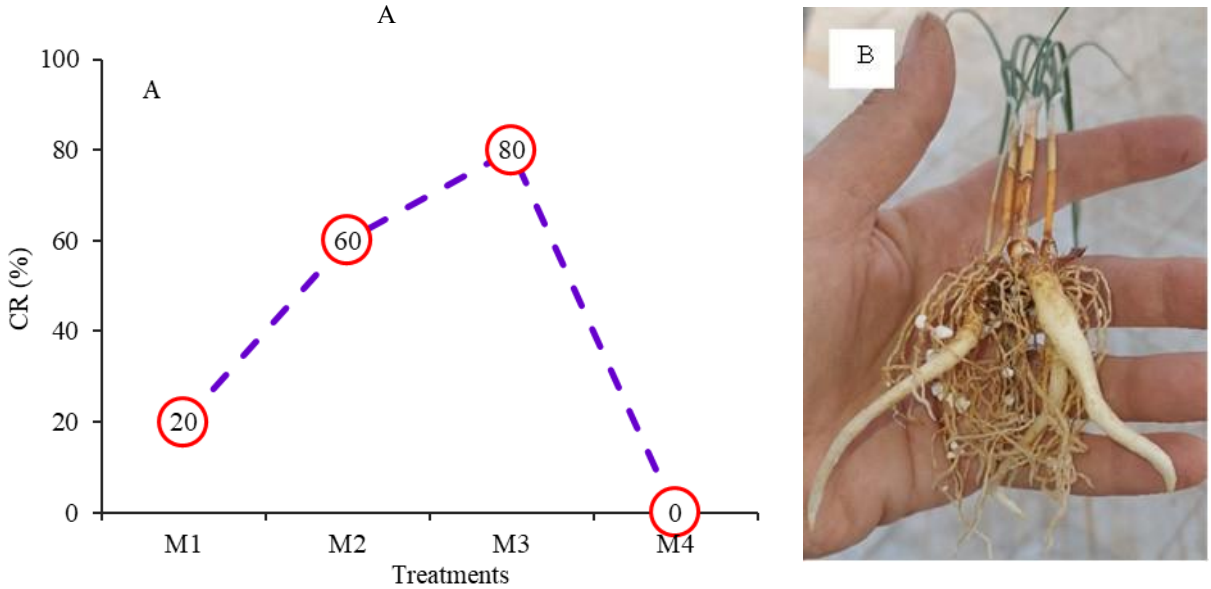
در ارزیابی تعداد بنه دختری زعفران، نکته مهم فراوانی تولید بنه دختری درشت، یعنی بنه‌های با وزن بیش‌تر از ۸ گرم، است، چرا که معمولاً قابلیت گل‌دهی در سال بعد را دارند. بررسی درصد وزنی این گروه از بنه‌های دختری (جدول ۳، ستون آخر) نشان می‌دهد که درصد وزنی بنه دختری درشت در تیمار چهار، با میانگین ۴۳/۲۱ درصد، بیش‌ترین است و پس از آن تیمار دو، با میانگین ۳۸/۵۷ درصد، قرار دارد. درحالی‌که درصد وزنی بنه دختری درشت در دو تیمار یک و سه کم‌تر از ۱۰ درصد است و بین این دو تیمار نیز اختلافی معنی‌دار دیده نمی‌شود.

اثر نوع بستر کشت بر تشکیل ریشه‌های رابط

شکل (۴-الف) نتایج آزمون کای اسکوئر روی داده‌های ریشه-های رابط را نشان می‌دهد. مقادیر شاخص پی بیانگر اثر معنی‌دار نوع بستر بر رشد ریشه‌های رابط (شکل ۴-ب) است. شکل (۴-الف) نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات پرلیت، درصد فراوانی ریشه‌های رابط از ۲۰ به ۸۰ درصد افزایش می‌یابد، درحالی‌که افزودن کوکوپیت و کوکوچیپس به بستر پرلیتی (تیمار چهار) موجب عدم تشکیل ریشه رابط می‌شود.

بحث

با توجه به اهمیت اقتصادی و اجتماعی تولید زعفران در ایران و دانسته‌های محدودی که در منابع علمی درباره شرایط مناسب برای رشد و نمو زعفران در سیستم کشت هیدروپونیک وجود دارد، در این پژوهش، اثر نوع بستر کشت بر رشد و نمو برگ و به ویژه بر تشکیل بنه دختری زعفران ارزیابی شد. نتایج تجزیه آماری نشان داد که تغییر در نوع بستر، اثری معنی‌دار بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه زعفران دارد.



شکل ۴. الف) اثر نوع بستر کشت (M1، M2، M3 و M4) بر تشکیل و درصد فراوانی ریشه‌های رابط (CR)، و ب) تصویر ریشه رابط رشد کرده در تیمار M2. بر اساس آزمون غیرپارامتریک، مقدار کای اسکوئر با درجه آزادی ۵ برابر ۱۱/۲۱ و سطح معنی‌داری برابر ۰/۰۴۷ بود. خط ناپیوسته بین نقاط صرفاً برای نشان دادن روند تغییر در داده‌ها است.

Fig. 4. A) The effect of substrate type (M1, M2, M3 and M4) on the formation and percentage of contractile roots (CR), and B) the image of contractile roots grown in M2 treatment. Based on the non-parametric test, the Chi Square value with 5 degrees of freedom was equal to 11.21 and the significance level was equal to 0.047. The dashed line between the points is just to show the trend of change in the data.

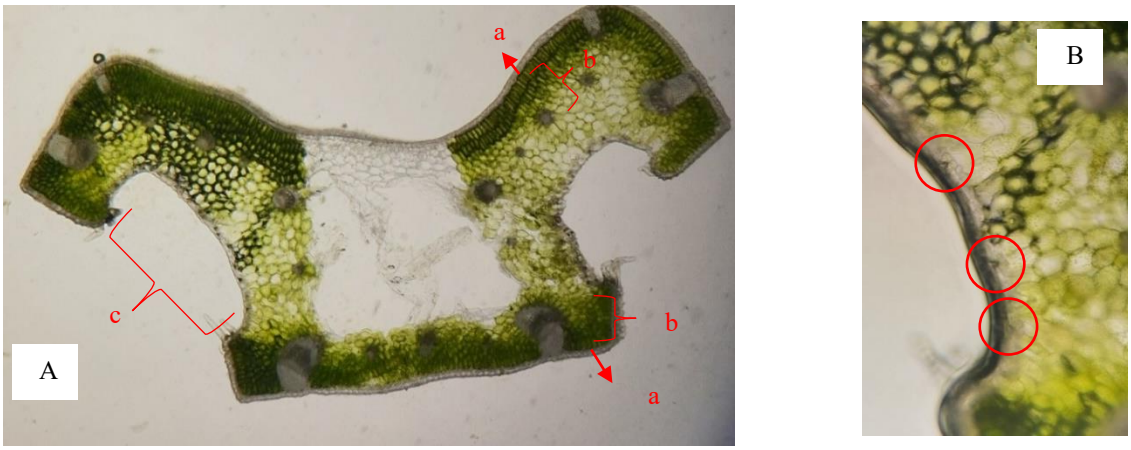
انتخاب بستر کشت بر اساس ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها

مقایسه ویژگی‌های فیزیکی مخلوط‌های یک تا چهار (جدول ۱) نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات پرلیت، گنجایش نگهداری آب (WHC) در بستر کشت کم و در مقابل گنجایش تهویه‌ای (AC) آن زیاد می‌شود. از طرف دیگر، بسترهای کشت دارای تخلخل کل (TP) یکسان، ممکن است دارای گنجایش نگهداری آب و گنجایش تهویه‌ای متفاوتی باشند. بنابراین در زمان انتخاب بستر کشت، علاوه بر تخلخل کل، باید به سهم منافذ ریز و درشت نیز توجه شود. افزودن کوکوپیت و کوکوچیپس موجب می‌شود تا تخلخل کل و گنجایش نگهداری آب در بستر کشت افزایش یابد ولی گنجایش تهویه‌ای آن کاهش پیدا کند. در مجموع به نظر می‌رسد بسترهایی مانند بستر یک که دارای گنجایش نگهداری آب زیاد (۵۵٪) و گنجایش تهویه‌ای کم (۱۹٪) هستند، برای رشد گیاهانی مناسب است که نیاز آبی زیادی دارند. اما برای گیاهی مانند زعفران، که نیاز آبی کمی دارد، بستری با گنجایش رطوبتی کم‌تر ولی گنجایش تهویه‌ای بیش‌تر، مانند بستر شش، مناسب‌تر است (Altland, 2006).

اثر نوع بستر کشت بر پاسخ اجزای مختلف گیاه زعفران

در شرایطی که تعداد برگ تمام تیمارها به لحاظ آماری یکسان است، افزایش وزن برگ را می‌توان به افزایش سطح یا ضخامت برگ نسبت داد (شکل ۱). بررسی نتایج سطح برگ (شکل ۳) نشان می‌دهد که در بسترهای دو و چهار، مقدار سطح برگ تقریباً یکسان ولی با اختلافی معنی‌دار نسبت به تیمارهای یک و سه بیش‌تر است. این نکته می‌تواند دلیل وزن بیش‌تر برگ در این دو بستر باشد. با توجه به این‌که سطح برگ در تیمارهای دو و چهار تقریباً یکسان است، وزن بیش‌تر برگ در بستر چهار را می‌توان به ضخامت بیش‌تر برگ نسبت داد.

شکل (۵-الف) برش عرضی برگ زعفران در تیمار چهار را



شکل ۵. الف) سطح مقطع عرضی برگ زعفران (M4) زیر میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ×۴ که در آن a) سلول‌های اپیدرم، b) سلول‌های مزوفیل، و c) کریپت را نشان می‌دهد، و ب) نقاط مشخص‌شده روزنه‌های فرورفته در قسمت کریپت (با بزرگنمایی ×۴۰) می‌باشند.

Fig. 5. A) Transverse section of saffron leaf (M4) under light microscope with ×4 magnification, showing a) epidermal cells, b) mesophyll cells, and c) crypt, and B) Marked points show the sunken apertures in the crypt part (with ×40 magnification)

نشان می‌دهد. در لبه بالا و لبه پایین برگ، لایه اپیدرم[2] و سپس لایه مزوفیل[3] متشکل از بافت نردبانی[4] با دو لایه سلولی و بافت اسفنجی با دو تا چهار لایه سلول وجود دارد (Ljubisavljević and Raca, 2020). در تمام گونه‌های Crocus در سطح زیرین برگ دو شیار ظریف در طرفین برگ بنام کریپت[5] وجود دارد (Fernández, 2004). در این قسمت برگ، روزنه‌های فرورفته[6] دیده می‌شوند (شکل ۵-ب). یکی از عوامل مؤثر بر آناتومی برگ زعفران ویژگی‌های اقلیمی است. در اقلیم نسبتاً خشک، به دلیل کاهش اندازه و تعداد سلول‌های اپیدرم و مزوفیل، ضخامت برگ کاهش می‌یابد ولی عمق و قطر کریپت افزایش پیدا می‌کند (Zarinkamar et al., 2011)، درحالی‌که تأمین کافی رطوبت موجب افزایش ضخامت برگ می‌شود (شکل ۳).

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که نوع بستر کشت بر شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای و بر فتوسنتز کل به‌صورت مستقیم (میزان فتوسنتز خالص) و غیرمستقیم (وزن خشک برگ) اثری معنی‌دار دارد. برگ بنه‌های رشدیافته در بستر چهار نسبت به برگ بنه‌های رشدیافته در بسترهای پرلیتی، فتوسنتز خالص لحظه‌ای بیش‌تری دارند (شکل ۲). به‌رغم یکسان‌بودن سطح برگ و فتوسنتز کل در بسترهای چهار و دو، وزن کل بنه‌ها که شاخصی از مقدار کربوهیدرات ذخیره‌شده ناشی از فرایند فتوسنتز در گیاهان است، در بستر چهار بیش‌تر است. می‌توان این فرضیه را مطرح کرد که افزایش ضخامت برگ زعفران در بستر چهار موجب انتقال دی‌اکسید کربن به تعداد بیش‌تری از سلول‌های مزوفیل می‌شود و در نتیجه کارایی فتوسنتز در واحد سطح برگ زعفران افزایش می‌یابد. افزایش سطح برگ موجب افزایش جذب نور می‌شود، درحالی‌که افزایش ضخامت برگ منجر به افزایش شدت فتوسنتز می‌شود (Pettigrew et al., 1993). در بین بسترهای پرلیتی نیز، برگ بنه‌های رشدیافته در بستر پرلیت متوسط نسبت به پرلیت ریز و پرلیت درشت فتوسنتز خالص لحظه‌ای بیش‌تری دارند. کاهش شدید شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای در بستر سه احتمالاً به علت کمبود رطوبت و تنش خشکی ناشی از آن است. در نقطه مقابل بستر سه، بستر چهار قرار دارد که به علت فراهمی بیش‌تر آب برای گیاهان، دارای بیش‌ترین شدت خالص فتوسنتز است. این تفاوت اهمیت رطوبت در تنظیم فتوسنتز برگ زعفران از راه تنظیم فعالیت روزنه‌ها را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، پتانسیل آب کم در بستر کشت منجر به کاهش نسبی مقدار آب در ریشه

2. Epiderma
3. Mesophyll
4. Palisade
5. Crypt
6. Sunken stomata

و برگ زعفران و در نتیجه کاهش شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای می‌شود (Renau-Morata et al., 2012). این در حالی است که بستر یک دارای بیش‌ترین گنجایش نگهداری رطوبت است ولی شدت فتوسنتز خالص لحظه‌ای آن کم‌تر از بستر چهار است. به نظر می‌رسد علت این یافته گنجایش تهویه‌ای خیلی کم در بستر یک است که منجر به کاهش غلظت اکسیژن در ناحیه ریشه و کاهش تولید برگ، فتوسنتز لحظه‌ای و در نتیجه فتوسنتز کل می‌شود (Bhattarai et al., 2006). بر این اساس، شرایط مساعد همزمان رطوبتی و تهویه‌ای در دو بستر دو و چهار موجب بهبود رشد برگ‌ها و فتوسنتز لحظه‌ای و در نتیجه افزایش شدت فتوسنتز کل می‌گردد.

در مجموع می‌توان گفت، نوع بستر کشت با تأثیر بر فرایندهای فیزیولوژیک گیاه، به‌طور غیرمستقیم تعداد و اندازه بنه‌های دختری را کنترل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش اندازه ذرات پرلیت در تیمار دو نسبت به تیمار یک موجب می‌شود تا نسبت مناسب‌تری از رطوبت و هوا در بستر کشت ایجاد شود که به نوبه خود موجب افزایش تعداد و وزن بنه‌های دختری درشت و متوسط می‌گردد. افزایش بیش‌تر اندازه ذرات پرلیت (مانند بستر سه) موجب کاهش رطوبت قابل دسترس برای گیاهان و در نتیجه موجب کاهش شدید تعداد و وزن بنه‌های دختری درشت می‌شود. این کاهش عملکرد را می‌توان به کاهش دسترسی گیاهان به آب و یا عناصر غذایی نسبت داد (Goliaris, 1999). افزودن کوکوپیت و کوکوچیپس به پرلیت متوسط موجب بهبود فراهمی آب و عناصر غذایی برای گیاهان و در نتیجه افزایش معنی‌دار وزن کل بنه‌های دختری به‌ویژه وزن و درصد بنه‌های درشت (مانند بستر چهار) می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که واکنش گیاهان به توزیع اندازه منافذ بستر کشت متفاوت است و شرایط بهینه برای هر گیاه باید به‌صورت اختصاصی بررسی شود (Gizas and Savvas, 2007).

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که نوع بستر کشت اثر جالب توجه دیگری بر رشد و نمو زعفران دارد و آن هم تشکیل ریشه‌های رابط است. این ساختار ریشه‌ای در شرایط نامساعد محیط کشت بر روی بنه‌های دختری تشکیل می‌شود و به کمک نیروهای کششی خود را به اعماق بستر، جایی با کم‌ترین نوسانات محیطی، می‌رساند. به نظر می‌رسد که این ساختار غده‌ای عارضه‌ای است که با مصرف کربوهیدرات‌های تولیدشده در گیاه، سبب ریزشدن بنه‌های دختری می‌شود (Koocheki et al., 2016). در تمام تیمارهای پرلیت خالص با دانه‌بندی متفاوت، ریشه رابط مشاهده شد، درحالی‌که در مخلوط پرلیت متوسط و ماده آلی (بستر چهار) ریشه رابط تشکیل نشد. این تفاوت بیانگر آن است که نوع مواد تشکیل‌دهنده بستر، عامل محرک رشد ریشه‌های رابط است که احتمالاً از راه نوسان‌های دمایی و یا نفوذ نور به گیاه القا می‌شود. اگرچه درصد ریشه‌های رابط تشکیل‌شده در سه تیمار یک، دو و سه اختلافی معنی‌دار ندارد، ولی با افزایش اندازه پرلیت از تیمار یک تا سه درصد فراوانی این ریشه‌ها از ۲۰ به ۸۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که بنه‌های زعفران در خاک‌های ریزبافت معمولاً ریشه رابط تشکیل نمی‌دهند درحالی‌که بنه‌ها در خاک‌های درشت‌بافت اغلب دارای ریشه رابط هستند (Rashed-Mohassel, 2020). چنانچه نوسان دما در بستر کشت عامل محرک رشد ریشه رابط باشد، این عامل تابعی از مقدار، گنجایش و رسانایی گرمایی اجزا تشکیل‌دهنده بستر است (Ihde, 2011). ذرات معدنی و آلی خاک، بسترهای غیرخاکی و هوا در مقایسه با آب گنجایش گرمایی کمی دارند؛ بنابراین نوسان دما در خاک خشک بیش‌تر از خاک مرطوب خواهد بود. اجزای معدنی و آلی خاک‌های با بافت متفاوت (شنی در برابر رسی) و به‌طور مشابه بسترهای غیرخاکی (پرلیت درشت در برابر پرلیت ریز)، در زمان خشک‌شدن گنجایش گرمایی مشابه‌ای دارند، اما به دلیل اثر بافت و اندازه ذرات بر مقدار رطوبت بستر، به‌صورت غیرمستقیم بر گنجایش گرمایی آن اثر می‌گذارند. در نتیجه مقدار رطوبت خاک یا بستر غیرخاکی عامل اصلی کنترل‌کننده گنجایش گرمایی آن است. برخی پژوهشگران نفوذ نور به درون خاک (Jaffe and Leopold, 2007)، یا بستر غیرخاکی، را عامل اصلی

محرک تولید ریشه رابط معرفی کرده‌اند. بر اساس این فرضیه، تابش نور بر برگ‌های فرورفته در غلاف زعفران که در نزدیکی سطح خاک یا بستر غیرخاکی قرار دارند، سیگنال اولیه القای تولید ریشه رابط را تولید می‌کند و الزامی به نفوذ نور تا ناحیه ریشه نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تدریجی اندازه ذرات و منافذ در بسترهای کشت یک تا سه، نور تا عمق بیش‌تری نفوذ می‌کند و موجب القای تولید ریشه رابط از راه تابش بر غلاف برگی در زیر سطح بستر کشت می‌شود. این فرآیند در بسترهای یک تا سه با افزایش اندازه ذرات بستر محتمل‌تر شده و موجب افزایش تعداد ریشه رابط می‌شود. درحالی‌که در تیمار چهار، علاوه بر گنجایش رطوبتی بیش‌تر، رنگ تیره ناشی از حضور کوکوپیت و کوکوچیپس موجب جذب بیش‌تر نور (Nwankwo and Ogagarue, 2012) و کاهش انتقال آن به لایه‌های زیرین بستر و در نتیجه عدم تشکیل و یا رشد ریشه رابط می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بهینه‌سازی سیستم کشت هیدروپونیک موجب افزایش بهره‌وری در تولید بنه زعفران می‌شود. ترکیب مواد سازنده بستر کشت با کنترل مقدار رطوبت و تهویه محیط ریشه، بر رشد برگ، فتوسنتز و در نهایت بر تعداد و وزن بنه‌های دختری اثر می‌گذارند. هرچند پرلیت با اندازه ذرات ۵-۳ میلی‌متری به‌سبب تأمین نسبت مناسبی از رطوبت و هوا موجب بیش‌ترین مقادیر وزن برگ، فتوسنتز و بنه دختری درشت می‌شود، اما به‌دلیل داشتن گنجایش گرمایی کم و نفوذ بیش‌تر نور موجب تولید ریشه‌های رابط و در نتیجه هدررفت کربوهیدرات تولیدی می‌شود. افزودن کوکوپیت و کوکوچیپس به پرلیت ۵-۳ میلی‌متری موجب افزایش گنجایش نگهداری آب در بستر، افزایش وزن برگ، فتوسنتز لحظه‌ای و وزن بنه‌های درشت، و مانع تشکیل ریشه‌های رابط می‌شود. در مجموع یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که هرچند زعفران گیاهی ژئوفیت با نیاز آبی کم است اما تأمین رطوبت و عناصر غذایی برای ذخیره مواد غذایی در بنه و تکثیر کارآمد آن برای نسل‌های بعدی ضروری است.

تشکر و سپاسگزاری

محققان این پژوهش، از حمایت مالی دانشگاه تربیت مدرس کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. Altland, J.E., 2006. Physical properties of container media. Available: https://www.fresnocss.com/plantdocs/Physical%20properties%20of%20container%20media.pdf.
2. Awang, Y., Shaharom, A.S., Mohamad, R.B., Selamat, A., 2009. Chemical and physical characteristics of cocopeat-based media mixtures and their effects on the growth and development of *Celosia cristata*. Am. J. Agric. Biol. Sci. 4(1), 63–71. https://doi.org/https://doi.org/10.3844/ajabssp.2009.63.71.
3. Bhattarai, S.P., Pendergast, L., Midmore, D.J., 2006. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils. Sci. Hortic. 108(3), 278–288. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.02.011.
4. Blythe, E.K., Sibley, J.L., Tilt, K.M., Zinner, B., 2005. Monolithic slag as a substrate for rooting and bare-rooting stem cuttings. J. Environ. Hortic. 23(2), 67v71. https://doi.org/10.24266/0738-2898-23.2.67.
5. Cole, D., Sibley, J., Blythe, E., Eakes, D., Tilt, K., 2005. Effect of cotton gin compost on substrate properties and growth of azalea under differing irrigation regimes in a greenhouse setting. HortTechnology, 15(1), 145–148.
6. de Juan, J.A., Córcoles, H.L., Muñoz, R.M., Picornell, M.R., 2009. Yield and yield components of saffron under different cropping systems. Ind. Crops Prod. 30(2), 212–219. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.03.011.
7. Fernández, J.-A., 2004. Biology, biotechnology and biomedicine of saffron. In: Pandalai, S.G. (Ed.), Recent Research Developments in Plant Science. Research Signpost, Trivandrum, India, pp. 127–159.
8. Gizas, G., Savvas, D., 2007. Particle size and hydraulic properties of pumice affect growth and yield of greenhouse

crops in soilless culture. HortScience 42(5), 1274–1280.
9. Goliaris, A.H., 1999. Saffron cultivation in Greece. In: Negbi, M. (Ed.), Saffron: *Crocus sativus* L. Harwood Academic Publishers Amsterdam, pp. 73–85.
10. Gresta, F., Lombardo, G., Siracusa, L., Ruberto, G., 2009. Saffron, an alternative crop for sustainable agricultural systems: a review. Agron. Sustain. Dev. 28, 95–112. https://doi.org/10.1051/agro:2007030.
11. Ihde, N.A., 2011. Implications of residue removal on soil quality in southwest Kansas. Kansas State University.
12. Jaffe, M.J., Leopold, A.C., 2007. Light activation of contractile roots of Easter Lily. J.A.S.H.S. 132(5), 575–582 https://doi.org/10.21273/JASHS.132.5.575.
13. Koocheki, A., Moghaddam, P., Fallahi, H.-R., Aghhavani-Shajari, M., 2016. The study of saffron (*Crocus Sativus* L.) replacement corms growth in response to planting date, irrigation management and companion crops. Saffron Agron. Technol. 4(1), 3–18 https://doi.org/10.22048/jsat.2016.11895. (In Persian with English abstract)
14. Koocheki, A., Seyyedi, S.M., 2016. Effects of corm size, organic fertilizers, Fe-EDTA and Zn-EDTA foliar application on nitrogen and phosphorus uptake of saffron (*Crocus sativus* L.) in a calcareous soil under greenhouse conditions. Not. Sci. Biol. 8(4), 461–467. https://doi.org/10.15835/nsb.8.4.9891. (In Prsian with English abstract)
15. Ljubisavljević, I., Raca, I., 2020. Comparative morphological and leaf anatomical analysis of the species *Crocus danubensis* and *Crocus variegatus* (Iridaceae). Biol. 75(3), 381–391 https://doi.org/10.2478/s11756-020-00420-2.
16. Malandrino, M., Abollino, O., Giacomino, A., Aceto, M., Mentasti, E., 2006. Adsorption of heavy metals on vermiculite: influence of pH and organic ligands. J. Colloid Interface Sci. 299(2), 537–546 https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.03.011.
17. Maloupa, E., Mitsios, I., Martinez, P., Bladenopoulou, S., 1992. Study of substrates use in gerbera soilless culture grown in plastic greenhouses. Paper presented at the Symposium on Soil and Soilless Media under Protected Cultivation in Mild Winter Climates, March 1, Cairo, Egypt.
18. Mavrogianopoulos, G.N., 2016. Irrigation dose according to substrate characteristics, in hydroponic systems. Open Agric. 1(1), 1–6. https://doi.org/10.1515/opag-2016-0001.
19. Ministry of Agriculture Jihad. 2022. Agricultural Statistics: Horticultural and Greenhouse Products. Available: https://maj.ir/Dorsapax/userfiles/Sub65/Aj3-1401.pdf. (In Persian)
20. Mollafilabi, A., Koocheki, A., Rezvani Moghaddam, P., Nassiri Mahallati, M., 2014. Effect of plant density and corm weight on yield and yield components of saffron (*Crocus sativus* L.) under soil, hydroponic and plastic tunnel cultivation. Saffron Agron. Technol. 1(2), 14–28. https://doi.org/10.22048/jsat.20.14.4815. (In Persian with English abstract)
21. Negbi, M., 1999. Saffron Cultivation: Past, Present and Future Prospects, Vol. 154. Harwood Academic, Amsterdam.
22. Nwankwo, C., Ogagarue, D., 2012. An investigation of temperature variation at soil depths in parts of Southern Nigeria. Am. J. Environ. Sci. 2(4), 142–147. https://doi.org/10.5923/j.ajee.20120205.05.
23. Olle, M., Ngouajio, M., Siomos, A., 2012. Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: a review. Agriculture 99(4), 399–408.
24. Packer, A., Clay, K., 2000. Soil pathogens and spatial patterns of seedling mortality in a temperate tree. Nature 404(6775), 278–281.
25. Pettigrew, W., Heitholt, J., Vaughn, K., 1993. Gas exchange differences and comparative anatomy among cotton leaf-type isolines. Crop Sci. 33(6), 1295–1299.
26. Rashed-Mohassel, M.-H., 2020. Evolution and botany of saffron (*Crocus sativus* L.) and allied species. In: Koocheki, A., Khajeh-Hosseini, M. (Eds.), Saffron. Elsevier, pp. 37–57.
27. Renau-Morata, B., Nebauer, S., Sánchez, M., Molina, R., 2012. Effect of corm size, water stress and cultivation conditions on photosynthesis and biomass partitioning during the vegetative growth of saffron (*Crocus sativus* L.). Ind. Crops Prod. 39, 40–46. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.009.
28. Sabet Teimouri, M., Kafi, M., Avarseji, Z., Orooji, K., 2010. Effect of drought stress, corm size and corm tunic on morphoecophysiological characteristics of saffron (Crocus sativus L.) in greenhouse conditions. J. Agroecol. 2(2), 323–334. https://doi.org/10.22067/JAG.V2I2.7639. (In Persian with English abstract)
29. Souret, F.F., Weathers, P.J., 2000. The growth of saffron (*Crocus sativus L.*) in aeroponics and hydroponics. J. Herbs Spices Med. Plants 7(3), 25–35. https://doi.org/10.1300/j044v07n03_04.
30. Verdonck, O., De Vleeschauwer, D., De Boodt, M., 1981. The influence of the substrate to plant growth. Acta Hortic. 126, 251–258, https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1982.126.30.
31. Yang, L., Wang, Z., Yang, L., Li, X., Zhang, Y., Lu, C., 2017. Coco peat powder as a source of magnetic sorbent for selective oil–water separation. Ind. Crops Prod. 101, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.040.
32. Zarinkamar, F., Tajik, S., Soleimanpour, S., 2011. Effects of altitude on anatomy and concentration of crocin, picrocrocin and safranal in *Crocus sativus* L. Aust. J. Crop Sci. 5(7), 831–838.